

УДК 674:621.928.93

ПЕРЕРАБОТКА БИОМАССЫ В ТВЕРДОЕ БИОТОПЛИВО ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

ВОЙТОВ В.А. — д.т.наук, профессор (Харьковский университет сельского хозяйства имени Петра Василенко);
БОНДАРЕНКО М.В., к.т.наук (Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара);
БУНЕЦКИЙ В.А., аспирант (Харьковский университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)

Введение. Проанализируем существующие технологические подходы к переработке биомассы в гранулированное топливо с точки зрения качества готового продукта.

С точки зрения влияния технологического процесса на конечный продукт, все нормативы качества, регламентированные стандартом EN14961–2, можно разделить на две категории: нормативы, не зависящие от технологического воздействия на биомассу; нормативы, зависящие от технологического воздействия на биомассу

Применение нормативов первой категории ограничивает использование определенных видов биомассы и различных видов отходов её промышленной переработки по показателям, прямо или опосредованно связанных с их химическим составом. При этом, стандарт не требует жесткого исполнения потребителями и производителями, и нам известно множество примеров производства и использования твёрдого биотоплива, выходящих за рамки этих нормативов.

В любом случае, эта категория нормативов, в основном, не влияет на эффективность технологии переработки биомассы в топливные гранулы. Следовательно, анализ эффективности технологии производства топливных пеллет, с точки зрения их качества, следует проводить в рамках второй категории нормативов. При этом следует понимать, что спецификации стандарта ЕС-EN14961–2 являются отражением распространённых в настоящее время технологических подходов к производству твёрдого биотоплива, а эти подходы, в свою очередь, сводятся к четырём макроэтапам:

- 1) Предварительная подготовка сырья;
- 2) Сушка;
- 3) Прессование;
- 4) Охлаждение готовых гранул.

В этом случае, под критичностью необходимо понимать то, что относительно незначительные изменения физико-механических характеристик сырья могут приводить к глобальным изменениям показателей качества продукции. При этом, значительно увеличиваются энергозатраты на производство.

Кроме того, необходимо отметить, что существуют определённые виды биомассы, которые не поддаются переработке в твёрдое топливо с помощью этого технологического подхода (например — древесная кора).

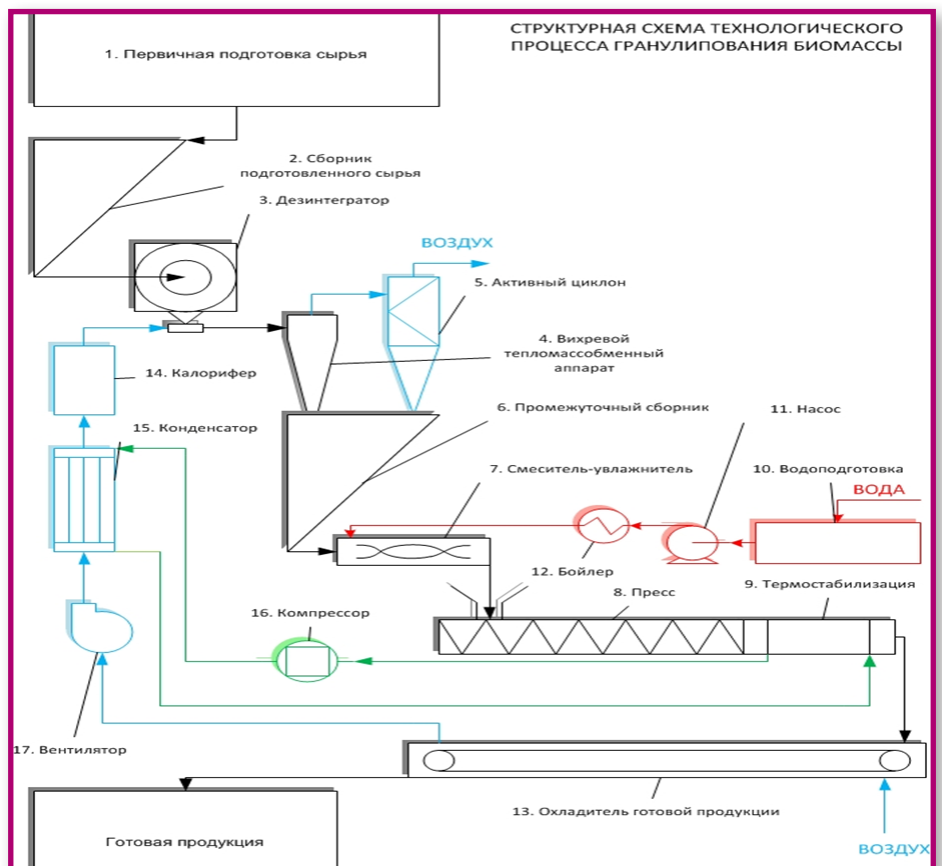
На основании вышеизложенных фактов, можно сделать вывод о несовершенстве современного технологического подхода, в независимости от

применяемого при его реализации технологического оборудования.

Для полноты картины необходимо дать оценку затратам, сопровождающим производство гранулированного биотоплива из биомассы.

В первую очередь — это затраты электрической и тепловой энергии. Анализ этих затрат проводился на основании информации предоставляемой производителями технологического оборудования и производителями гранулированного биотоплива, что позволило получить объективную картину и выделить несколько ключевых моментов.

Во-первых, были выявлены и проанализированы элементы технологи-



ческого процесса, в которых сконцентрированы основные энергозатраты:

- 1) Предварительное измельчение сырья;
- 2) Сушка измельченного сырья;
- 3) Прессование биомассы.

Во-вторых, проявилось явное несоответствие между информацией о расходе энергии на единицу производимой продукции, предоставленной производителями биотоплива и заявленной производителями оборудования для его производства, что связано с критической зависимостью процессов, происходящих с биомассой при её технологической переработке от физико-химических свойств сырья.

В-третьих, стало понятно, что все производители «выносят за скобки» учета энергозатрат тепловую энергию, потребляемую в процессе сушки предварительно измельченной биомассы. Это не позволяет корректно оценить эффективность производства, т.к. речь идёт о генерации десятков МВт тепла на тонну готовой продукции и требует ощутимых капитальных и эксплуатационных затрат.

В-четвертых, обращает на себя внимание тот факт, что оборудование, с помощью которого осуществляются вышеперечисленные элементы технологического процесса, является самым инвестиционно-затратным, но при этом подвержено быстрому износу, и эта тенденция не зависит от производителя оборудования.

Таким образом, анализ эффективности существующей технологии с точки зрения затрат, приводит к выводу о несовершенстве современных технологических подходов к производству твёрдого биотоплива.

С нашей точки зрения, основной причиной современного состояния обсуждаемой выше технологии, является отсутствие адекватного понимания физико-химических закономерностей, обуславливающих процессы, происходящие при гранулировании биомассы. Важно подчеркнуть, что процесс разработки технологии гранулирования биомассы с целью получения топлива, исторически использовал внешне аналогичные технологические подходы

к производству гранулированных кормов. Прямой механический перенос «кормовой» технологии на «топливную» — не корректен. Это связано с тем, что химический и гранулометрический состав сырья для гранулирования имеют принципиальные отличия, а различные цели использования продукта требуют от получаемых гранул отличающихся потребительских свойств.

Подводя итоги всего вышесказанного, мы пришли к такому принципиальному заключению:

Дальнейшее совершенствование технологии получения твёрдого гранулированного биотоплива лежит в поле изменения существующих технологических подходов и должно основываться на глубоком понимании физико-химических свойств биомассы. В первую очередь необходимо построить корректную физико-химическую модель биомассы как объекта для гранулирования. Затем на этой базе разработать технологию и подобрать существующее или создать новое оборудование для практической реализации этой технологии для производства.

Дальнейшая классификация нормативов стандарта ЕС, где критерием становится инвариантность качества топливных пеллет к физическим характеристикам биомассы (таким как температура, влажность, дисперсный состав, механические свойства и др.) на входе в технологический процесс при неизменной проектной производительности, приводит нас к выделению двух условных групп:

1) Показатели, не зависящие от изменения физических свойств биомассы — диаметр, длина и абсолютная влажность;

2) Показатели, критичные к изменениям физических свойств биомассы — насыпная плотность, содержание мелкой фракции, механическая стойкость.

В этом случае под критичностью необходимо понимать то, что относительно незначительные изменения физико-механических характеристик сырья могут приводить к глобальным изменениям показателей качества продукции. При этом могут значительно изменяться энергозатраты на производство.

В процесс разработки технологий гранулирования биомассы с целью получения топлива исторически использовались технологические подходы, аналогичные производству гранулированных кормов. Однако прямой механический перенос «кормовой» техноло-



Рис.1. Опытный образец технологической линии гранулирования биомассы

гии на «топливную» - не корректен. Это связано с тем, что химический и гранулометрический состав сырья для гранулирования имеют принципиальные отличия, а различия в назначении продукта требуют от получаемых гранул других потребительских свойств.

Таким образом, можно сформулировать актуальную задачу по разработке технологии гранулирования биомассы более эффективной, чем существующие технологии. Для этого, в первую очередь, необходимо построить корректную физико-химическую модель биомассы как объекта для гранулирования.

1. В заключение краткого описания физико-химической модели биомассы необходимо сделать некоторые выводы.

- Построенная нами физико-химическая модель даёт возможность ответить на большинство вопросов, связанных с различными аспектами реализации существующих технологических подходов к производству твёрдого гранулированного биотоплива.

- Физико-химическая модель позволяет реализовать новый технологический подход к промышленной переработке биомассы, технические решения на базе которого приведут к увеличению эффективности производства гранулированного биотоплива и будут характеризоваться высокой инвариантностью по отношению к сырью.

- Новый технологический подход позволит управлять качеством производимой продукции, что, рано или поздно, приведёт к изменению стандартов качества твёрдого биотоплива.

2. **Презентация технологии.** На основании представленной в третьей части физико-химической модели нами была разработана и реализована технология гранулирования биомассы для производства топлива, состоящая из последовательности четырёх основных технологических этапов:

- Первичная подготовка сырья;
- Окончательная подготовка биомассы к гранулированию;
- Прессование;
- Охлаждение и стабилизация влажности гранул.

Рассмотрим каждый из этапов более подробно, при этом обратим особое внимание на основные отличия разработанной технологии в её сравнении с технологией, массово применяемой сегодня для переработки биомассы (см. позицию 2.1). Это сравнение

будем проводить в разрезе технологических процессов и оборудования, необходимого для их реализации.

2.1. Основными технологическими задачами, решаемыми на этапе предварительной подготовки сырья, являются:

2.1.1. Удаление минеральных и других инородных примесей. Для этого могут применяться различные типы просеивателей и сепараторов, используемых в настоящее время.

2.1.2. Приведение всего исходного сырья к необходимому для дальнейшей переработки фракционному составу. Требования к максимальному размеру частиц биомассы (≤ 10 мм в случае нового подхода против ≤ 3 мм в «стандартном» случае) являются существенным технологическим отличием. Необходимо отметить, что при выборе типа технологического оборудования для «грубого» измельчения биомассы, предпочтение необходимо отдавать измельчителям, которые максимально используют при работе физический механизм деформации сдвига с преобладающей составляющей резания. Это связано с капиллярно-пористой и волокнистой внутренней

структурой биомассы.

2.2. Основными технологическими задачами, решаемыми на этапе окончательной подготовки биомассы, являются:

Микроизмельчение биомассы. Это изменение фракционного состава сырья до максимального размера частиц ≤ 100 мкм. В качестве базового подхода к диспергированию биомассы нами был выбран процесс дезинтегрирования. Такой подход к диспергированию максимально эффективен при измельчении «лёгких» и мягких капиллярнопористых материалов, абразивность которых невелика. Для его реализации нами был разработан и запатентован специализированный дезинтегратор, конструкция которого учитывает, в первую очередь, волокнистую структуру биополимеров при их измельчении.

2.2.1. Сушка микроизмельчённой биомассы. Принципиальным отличием процесса сушки в случае нового технологического подхода становится то обстоятельство, что при микроизмельчении биомассы до размеров частиц ≤ 100 мкм полностью разрушается макрокапиллярная структура исходного капил-



Рис.2. а) исходное сырье — гидролизный лигнин; б) готовые гранулы; в) готовые гранулы (крупный масштаб).



Рис.3. а) исходное сырье — торф; б) гранулы.

лярнопористого вещества. Это принципиально меняет кинетику процесса сушки биомассы и позволяет перейти к использованию высокоэффективного сушильного оборудования. В качестве технологического оборудования на этой стадии процесса мы используем циклонный теплообменник аппарат, выполняющий одновременно несколько функций — сушку, нагрев и первую стадию сепарации перерабатываемого сырья.

2.2.2. Аспирация использованного воздуха. Процесс аспирации воздуха является обязательным элементом любого технологического процесса, связанного с переработкой древесины. В нашем случае, система аспирации должна выполнять функцию очистки влажного воздуха с одновременным возвратом сепарированных микрочастиц биомассы в технологический процесс. Этот момент является одной из важных отличительных особенностей нашего технологического подхода к переработке биомассы. В качестве технологического оборудования для реализации процесса, используется два последовательно расположенных аппарата, первый из которых упомянут

выше, а второй разработан специально для улавливания древесной пыли специалистами кафедры «Системотехники и технологий лесного комплекса» ХНТУСХ им. П. Василенко, и представляет собой циклон со встроенным ротором специальной конструкции.

2.2.3. Регулирование влажности биомассы. Финальной стадией технологического этапа окончательной подготовки биомассы является регулирование влажности биомассы перед началом процесса прессования. Необходимость такого процесса обусловлена с одной стороны тем, что, исходя из физико-химической модели, показатели влажности и температуры материала критичны для эффективного прессования биомассы, а с другой стороны, этими показателями крайне сложно управлять в режиме «on-line» на предшествующих стадиях этого технологического этапа переработки материала. Процесс сушки микроизмельченной биомассы специально проводится таким образом, что в результате мы получаем «пересушенный» на 2–3% материал, который после точного измерения абсолютной влажности, необходимо увлажнить до «эффективного» показателя

абсолютной влажности. Для этого нами используется аппарат, представляющий собой двухшнековый смеситель с форсунками для распределённой подачи подготовленной воды.

2.3. Основными технологическими задачами, решаемыми на этапе прессования, являются: максимальное уплотнение предварительно подготовленной биомассы под воздействием «медленных» нагрузок, при которых деформации материала имеют выраженный вязко-текучий характер и формирование гранул заданных геометрических размеров. Основным отличием предлагаемой технологии от «стандартных» является характер прилагаемых к объекту прессования нагрузок. Общеизвестно, что при всём разнообразии конструкций прессов, используемых в настоящее время для гранулирования биомассы, все они характеризуются:

- в случае использования поршневых или роликовых прессов, механизмом «быстрых» ударных нагрузок на материал с высокой дискретизацией;
- в случае использования шнековых прессов, применением «коротких» прессов с высокой частотой вращения шнека (≥ 1000 оборотов/минуту), что, при непрерывном характере нагрузки, ведёт к преобладанию упругого механизма деформации материала.

Для реализации нового технологического подхода нами применён «длинный» двухшнековый пресс-экструдер с низкой частотой вращения и возможностью дополнительного нагрева прессуемого материала. Понятно, что использование такой машины привело к принципиальному улучшению её эксплуатационных характеристик, относительно используемых в настоящее время прессов.

2.4. Основными технологическими задачами, решаемыми на этапе охлаждения и стабилизации влажности гранул, являются:

2.4.1. Стабилизация сформированной структуры гранул путем снижения их температуры при минимальных нарушениях сформированной структуры. Снижение температуры гранулированной биомассы, как указывалось выше, ведёт к изменению релаксационных состояний биополимерных компонентов материала и приводит их в твердое фазовое состояние. Важным соображением, определяющим динамику технологического процесса на этой стадии, является фазовое состояние воды, присутствующей во внутренней струк-



Рис.4. а) исходное сырье — компост; б, в) готовая гранула.



Рис.5. Гранулы из растительных отходов, образующихся при уборке подсолнечника.

туре материала. Понятно, что резкое снижение давления при неизменной температуре приведёт к интенсивному вскипанию воды внутри формирующейся биополимерной структуры. Это, в свою очередь, создаст условия для нежелательного, с точки зрения конечного качества, частичного разрушения формирующихся гранул. Таким образом, температура и давление в любой точке материала на этой технологической стадии должны быть согласованы с температурой и давлением воды на линии насыщения, в том смысле, что вода при этих же параметрах должна гарантированно находиться в жидком фазовом состоянии. Для соблюдения этого условия в качестве теплообменного аппарата нами используется «длинная» формирующая гранулы матрица с интенсивным принудительным охлаждением.

2.4.2. Удаления из сформированных гранул избыточной влаги. Для придания готовому продукту требуемых стандартом ЕС характеристик влажности необходимо удалить из него избыточную жидкость в количестве до 5% абсолютной влажности и охладить готовые гранулы до температуры хранения. В качестве технологического оборудования на этой технологической стадии используется ленточный воздушный охладитель, позволяющий свести к минимуму механические и температурные напряжения, неизбежно сопровождающие этот процесс.

2.5. Обсуждение результатов. Теперь можно представить некоторые результаты, полученные при переработке различных видов биомассы с использованием представленного технологического подхода.

3. Практические результаты

На основании представленной в третьей части физико-химической модели была разработана и реализована технология гранулирования биомассы для производства топлива. Реализация состоит в разработке проектной документации и легализации технических условий (ТУ 29.5-2571100774-001) на технологическую линию производительностью 1000 кг/час. Был изготовлен и испытан опытный образец технологической линии (Рис. 1).

С помощью опытного образца технологической линии, были переработаны в топливные гранулы пробные партии таких видов биомассы (рис. 2).

Оценка качества полученных гранул показала следующие результаты: 1) насыпная плотность — 800–850



Рис. 6. а) исходное сырье — кора хвойных пород древесины; б) готовые гранулы

кг/м³ (мнимая плотность — 1300–1350 кг/м³); 2) содержание мелкой фракции — ≤0,2%; 3) механическая стойкость — 99,3%. При этом, показатели качества, отражающие химический состав топливных гранул, оставались неизменными относительно сырья. Это означает, что новый технологический подход к переработке биомассы позволяет получать топливные гранулы с показателями качества, значительно превышающими требования стандарта ЕС, вне зависимости от типа биомассы, что подтверждает нашу гипотезу об инвариантности технологии по отношению к сырью.

4. Выводы

Предложенная физико-химическая модель позволяет:

- 1) ответить на большинство вопросов, связанных с различными аспектами реализации существующих технологических подходов к производству твёрдого гранулированного биотоплива;
- 2) реализовать новый технологический подход к промышленной переработке биомассы, технические решения на базе которого приведут к увеличению эффективности производства гранулированного биотоплива и будут характеризоваться высокой инвариантностью к свойствам исходного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аким Э. Л. Релаксационное состояние полимерных компонентов бумаги и его влияние на механические свойства / Э. Л. Аким // I Международная научно-техническая конференция «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» — Архангельск, 13–17 сентября 2011 г. — С. 24–33.
2. Дарманьян П. М. Физико-химические основы технологии гранулирования комбикормов и их компонентов: Автореф. дис. ... д. т. н / П. М. Дарманьян. — Одесса: Одесский технологический институт пищевой промышленности, 1992. — 32 с.
3. Евстигнеев Э. И. Химия древесины: Учеб. пособие. / Э. И. Евстигнеев. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. — 2007. — 148 с.
4. DIN EN14961-2:2011-09. Solid biofuels — Fuel specifications and classes

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано сучасний стан технології переробки біомаси в тверде паливо. На основі проведеного аналізу та запропонованої фізико-хімічної моделі біомаси сформульовані основні положення нової технології переробки. Представлені: дослідний зразок технологічної лінії, що реалізує запропоновану технологію, і результати роботи технологічної лінії на різних типах біомаси.

Ключові слова: біомаса, мікроподрібнення, гранулювання, полімер, релаксаційний стан, пресування, технологічна лінія.

АННОТАЦИЯ

В статье проведен анализ современного состояния технологии переработки биомассы в твердое топливо. На основе проведенного анализа и предложенной физико-химической модели биомассы сформулированы основные положения новой технологии переработки. Представлены опытный образец технологической линии, реализующей предложенную технологию, и результаты работы технологической линии на различных типах биомассы.

Ключевые слова: биомасса, микроизмельчение, гранулирование, полимер, прессование, технологическая линия.

ABSTRACT

The article analyzes the current state of technology for processing biomass into solid fuel. On the basis of the analysis and the proposed physical-chemical model of biomass formulated the basic principles of the new processing technology. Presented a prototype of the production line implementing the proposed technology and the results of the production line at various types of biomass.

Keywords: biomass, polymer extrusion, disintegration, granulation, production line